



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AERODYNAMICKÉ PRVKY NÁKLADNÍCH SOUPRAV

AERODYNAMIC DESIGN OF HEAVY COMMERCIAL VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrej Šulák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Fojtášek

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Andrej Šulák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Fojtášek**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aerodynamické prvky nákladních souprav

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aerodynamické prvky nákladních vozidel slouží především ke snížení aerodynamického odporu a tím k úspoře nákladů na provoz vozidla, ale také plní celou řadu dalších funkcí. Výrobci neustále pracují a rozvíjejí provedení těchto systémů a zdokonalují tak proudění vzduchu kolem vozidla. Zároveň však tyto prvky musí být jakýmsi kompromisem mezi praktickou funkčností nákladní soupravy a jejím aerodynamickým odporem.

Cíle bakalářské práce:

Rešeršní práce shrnující poznatky ohledně aerodynamických prvků moderních nákladních vozidel:

- základní pojmy aerodynamiky vozidel,
- rozdělení prvků aerodynamiky a jejich účel,
- popis těchto systémů,
- konstrukční provedení,
- další vývoj těchto systémů.

Seznam literatury:

HUCHO, W. H.: Aerodynamics of road Vehicles. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 07-680-0029-7.

REIMPELL, J.: The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5054 0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Táto bakalárska práca pojednáva o aktuálne dostupných aerodynamických prvkoch pre nákladné súpravy. Hlavným cieľom je zbližiť čitateľa s danou problematikou, kde na začiatku sú popísané potrebné základy aerodynamiky a následne sú vysvetlené funkcie jednotlivých prvkov, ktoré majú neraz aj inú úlohu okrem zvyšovania aerodynamickej účinnosti.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

aerodynamika, nákladné vozidlo, aerodynamické prvky, aerodynamická účinnosť

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the currently available aerodynamic drag reduction devices for articulated and drawbar trucks. The main goal is to reveal the given topic to the reader, beginning with some basic information about aerodynamics and then explaining how these drag reduction devices work. They often provide additional benefits apart from improving aerodynamic efficiency.

KEYWORDS

aerodynamics, truck, drag reduction devices, aerodynamic efficiency



BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠULAK, A. *Aerodynamické prvky nákladních souprav*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Fojtášek.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Fojtáška a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 27. mája 2016

.....

Andrej Šulák



POĎAKOVANIE

V prvom rade ďakujem vedúcemu tejto bakalárskej práce Ing. Janovi Fojtáškovovi za jeho trpezlivosť a odborné rady. Rovnako patrí veľká vďaka mojim rodičom, ktorí mi vždy prejavovali podporu a pomáhali mi hľadať motiváciu keď ja som ju strácal.



OBSAH

Úvod	9
1 Úvod do aerodynamiky cestných vozidiel	10
1.1 Základné pojmy prúdenia tekutín	10
1.1.1 Prúdnicia	10
1.1.2 Druhy prúdenia	10
1.1.3 Súčiniteľ aerodynamického odporu	11
1.2 Metódy merania súčiniteľa odporu a ich aplikácia na nákladné vozidlá	11
1.2.1 Veterný tunel	11
1.2.2 Počítačová simulácia	12
1.3 Prioritné úlohy aerodynamiky pre nákladné súpravy	13
2 Aerodynamické vylepšenia	15
2.1 Predná časť ťahača	15
2.1.1 Zaoblenie hrán	16
2.1.2 Usmerňovače vzduchu	16
2.1.3 Spojler	17
2.1.4 Aerodynamické spätné zrkadlá	18
2.1.5 Slnecná clona	19
2.2 Prechod medzi kabínou a návesom	19
2.2.1 Strešný deflektor	20
2.2.2 Strešný spojler	21
2.2.3 Bočné deflektory	22
2.3 Kolesá a podvozok	22
2.3.1 Bočné panely	22
2.3.2 Kryty palivovej nádrže	23
2.3.3 Kryty kolies	23
2.4 Zadná strana návesu	24
2.4.1 Koniec návesu	24
2.4.2 Generátory vírenia	25
2.4.3 Kvapkovitý náves	26
Záver	27
Zoznam použitých skratiek a symbolov	30



ÚVOD

Aerodynamika je veda zaoberajúca sa skúmaním pohybu vzduchu a iných plynov a spôsobom, akým rôzne objekty s daným plynom pri vzájomnom pohybe interagujú. Práve aerodynamika hrá veľkú rolu pri navrhovaní väčšiny dopravných prostriedkov, či už sa jedná o lietadlo, vlak alebo osobný automobil. Ciele pritom ale nie sú vždy spoločné.

V prípade nákladných súprav, o ktorých sa bude v práci pojednávať ide v prvom rade najmä o zníženie nákladov na prevádzku, čo je možné dosiahnuť aplikáciou adekvátnych aerodynamických prvkov, ktoré zlepšujú aerodynamickú účinnosť súpravy. Pri diaľničných rýchlostiach je vplyvom aerodynamiky stratená približne polovica použiteľnej energie z motora ale napriek tomu žiaľ často sledujeme, že je tento fakt zanedbávaný. Pri výbere vhodného prvku je pritom nevyhnutné brať do úvahy viacero faktorov ako je jeho pozitívny prínos, cena a rovnako praktickosť daného konštrukčného prevedenia. Niektoré aerodynamické prvky prinášajú pritom aj radu ďalších výhod, ktoré sú konkrétne vysvetlené pri jednotlivých prvkoch.

Pre kompletné vymedzenie pojmov, pod pojmom nákladná súprava rozumieme buď návesovú súpravu, zloženú z ťahača a návesu alebo súpravu s vlekom, ktorá sa skladá z nákladného auta a jedného alebo viacerých prídavných prívesov. Väčšina prvkov je spoločných pre oba typy súprav, ale ich dopad vďaka odlišnej konštrukcii nemusí byť vždy rovnaký.



1 ÚVOD DO AERODYNAMIKY CESTNÝCH VOZIDIEL

1.1 ZÁKLADNE POJMY PRÚDENIA TEKUTÍN

1.1.1 PRÚDNICA

Prúdnica je myslená krivka, pre ktorú platí, že v každom jej bode určuje dotyčnica k tejto krivke smer rýchlosti pohybujúcej sa častice tekutiny. Každým bodom tekutiny prechádza práve jedna prúdnica a prúdnic sa nemôžu navzájom pretínať.[26]

1.1.2 DRUHY PRÚDENIA

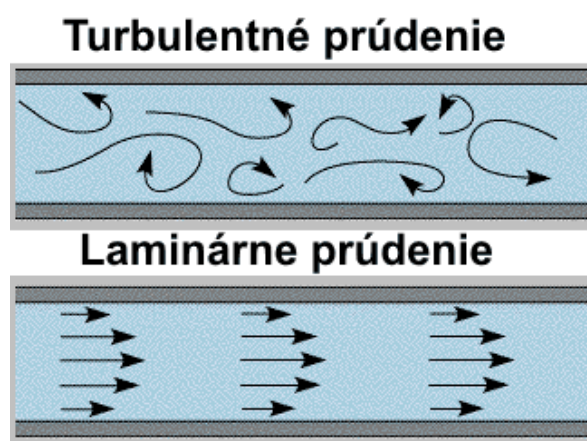
Z hľadiska rýchlosti prúdenia tekutiny poznáme dva základné charaktery prúdenia:

LAMINÁRNE PRÚDENIE

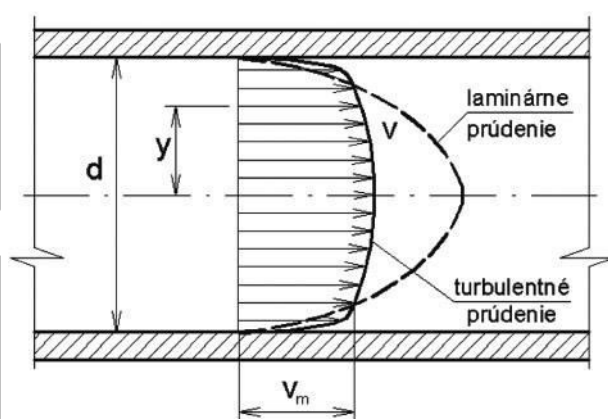
O laminárnom prúdení hovoríme v prípade, ak sa tekutina pohybuje rovnomerne, usporiadane, a vrstvy tekutiny sa po sebe pravidelne posúvajú. Obraz prúdnic je stály a prúdnic sú rovnobežné. [11] Rýchlostný profil laminárneho prúdenia tekutiny v rúre vykresľuje parabolu. [7]

TURBULENTNÉ PRÚDENIE

V opačnom prípade ide o prúdenie turbulentné, ktoré je charakteristické svojou neusporiadanosťou. Na rozdiel od laminárneho nastáva pri vyšších rýchlostiach prúdenia (konkrétne nad určitou kritickou rýchlosťou, ktorá sa dá zistiť z Reynoldsovho vzťahu, viď kapitola 1.2.1). Dokážeme zreteľne pozorovať nestálosť obrazu prúdnic a vírenie kvapaliny. Pri tomto type prúdenia dochádza k stratám energie vplyvom vytvárania vírov [11].



Obr. 1 Znáozornenie typov prúdení[11]



Obr. 2 Rýchlostný profil prúdení[7]

Kvôli stratám energie pri turbulentnom prúdení je laminárne prúdenie prijateľnejšie a preto aj jednou z kľúčových úloh aerodynamiky je snaha o obmedzenie turbulentných prúdení v čo najvyššej miere.



Ďalej delíme prúdenie z hľadiska časového priebehu na[26]:

STACIONÁRNE PRÚDENIE

Stacionárne prúdenie nastáva v prípade že sa rýchlosť prúdenia tekutiny v danom mieste nemení s časom.

NESTACIONÁRNE PRÚDENIE

Na druhej strane prúdenie nestacionárne je charakteristické tým, že sa rýchlosť prúdenia tekutiny v danom mieste s časom mení.

1.1.3 SÚČINITEL' AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Kľúčovým parametrom v oblasti aerodynamiky je súčiniteľ aerodynamického odporu vzduchu c_D . Ide o bezrozmernú veličinu udávajúcu ako dokáže objekt interagovať s obtekajúcim vzduchom. Vystupuje v rovnici pre odporovú silu, ktorá je daná vzťahom [5]:

$$F_o = \frac{1}{2} c_D S \rho v^2, \quad (1)$$

kde F_o - odporová sila [N], c_D - súčiniteľ aerodynamického odporu [-], S - čelná plocha vozidla [m^2], ρ - hustota okolitého prostredia [kg/m^3], v - rýchlosť vozidla [m/s].

Zo vzťahu (1) vyplýva, že za podmienky konštantnosti ostatných veličín platí, že odpor vzduchu klesá s klesajúcim súčiniteľom c_D a v dôsledku toho vozidlo nemusí čeliť tak veľkej odporovej sile. Toto má priaznivý vplyv hlavne na spotrebu paliva, čo je veľmi dôležité najmä v prípade komerčných vozidiel, tj. autobusov, nákladných vozidiel a dodávok, ktoré sú orientované na čo najekonomickejšiu prevádzku. Jeho veľkosť závisí od tvaru vozidla a lokálne, zdanlivo zanedbateľné nedostatky tvaru ako rôzne dutiny, medzery v karosérii dokážu v relatívne veľkej miere zvýšiť hodnotu koeficientu. Je tiež dôležité si všimnúť, že odporová sila rastie s druhou mocninou rýchlosti, čo napovedá, že pri vysokých rýchlostiach je vplyv aerodynamického odporu značne vyšší.

1.2 METÓDY MERANIA SÚČINITEL'A ODPORU A ICH APLIKÁCIA NA NÁKLADNÉ VOZIDLÁ

Hodnota súčiniteľa aerodynamického odporu c_D sa určuje zväčša dvomi spôsobmi:

1.2.1 VETERNÝ TUNEL

Test aerodynamiky pomocou veterného tunela používa špeciálnu testovaciu komoru na zhodnotenie prúdenia vzduchu okolo vozidla a je používaný na meranie aerodynamickej účinnosti vozidiel a lietadiel.

Testovací model vozidla je pripevnený do stredu komory a vzduch prúdi šachtou pomocou ventilátoru. Toto umožňuje simulovať reálny vplyv prúdenia vzduchu pri rôznych



veterných podmienkach. Testovací model obsahuje zvyčajne nástroje na meranie sily vetra, tlaku vzduchu, rýchlosti vozidla, uhlov vetra a ďalších charakteristík.

Pre lepšiu simuláciu sú niektoré veterné tunely opatrené tzv. pohyblivou podlahou, ktorá má výhodou oproti klasickému riešeniu v tom, že berieme do úvahy aj vplyv relatívneho pohybu vozidla a vozovky a otáčania kolies. Taktiež sú mnohé schopné pootočená plošiny o nejaký uhol pre simuláciu vplyvu bočného vetra na aerodynamické vlastnosti.

Hlavným parametrom, ktorý sa vypočíta z údajov z veterného tunela je súčiniteľ odporu vzduchu c_D . Testujú sa rôzne varianty dizajnového prevedenia a pri každej sa posudzujú zmeny v odporových silách, ktoré sú potom použité na vypočítanie dopadu na spotrebu paliva. [3]

Na rozdiel od osobných automobilov, kde je možné bez problémov testovať vozidlo v bežnom veternom tuneli, je situácia s nákladnými vozidlami o niečo zložitejšia. Kvôli ich veľkosti je často nepraktické ich testovať v konvenčných tuneloch. Preto je zväčša výhodnejšie používať zmenšené modely, najbežnejšie v mierkach 1:2 alebo 1:5. Stretávame sa tu ale s jedným obmedzením a tým je bezrozmerné Reynoldsovo číslo dané vzťahom [18]:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (2)$$

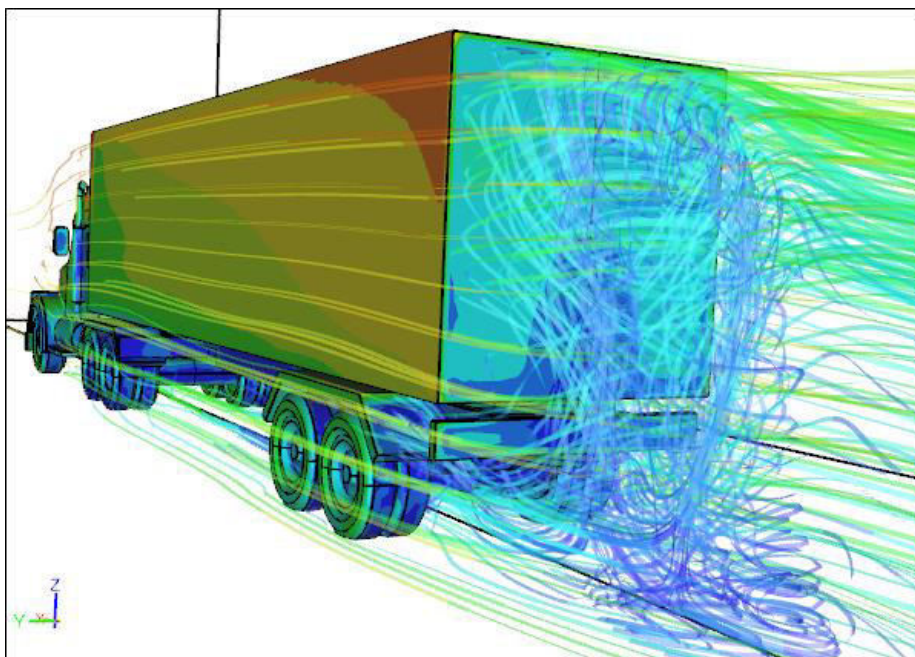
kde Re - Reynoldsovo číslo [-], ρ - hustota okolitého prostredia [kg/m^3], v - rýchlosť vozidla [m/s], D - charakteristický rozmer telesa [m], μ - dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

Reynoldsovo číslo je možné použiť na určenie, či bude tekutina prúdiť laminárne alebo turbulentne tým, že sa porovná s kritickou hodnotou. Pokiaľ Reynoldsovo číslo nedosahuje tejto hodnoty, ide o laminárne prúdenie, ak ju presahuje, jedná sa o prúdenie turbulentné.

Je nesmierne dôležité pri testovaní zmenšených modelov vo veterných tuneloch pretože ak by sa použili pre model rovnaké podmienky (rýchlosť vetra, hustota vzduchu) ako pre vozidlo v plnej mierke, výsledky by boli skreslené. Na to, aby sa dospelo k vierohodným výsledkom je potreba dosiahnuť práve rovnakého Reynoldsovho čísla. To je možné docieľiť zvýšením hustoty vzduchu v testovacej komore v rovnakom pomere, v akom je model menší oproti skutočnému vozidlu [18].

1.2.2 POČÍTAČOVÁ SIMULÁCIA

Známy aj pod názvom CFD (Computational fluid dynamics) software, počítačový program určený na simuláciu dynamiky tekutín umožňuje testovanie aerodynamickej účinnosti vozidla a ponúka vynikajúcu možnosť simulácie skutočných podmienok prevádzky vozidla, pričom výstupom je akási vizualizácia interakcie vozidla s okolitým vzduchom a vetrom. Dokáže ukázať, ako reagujú rôzne časti vozidla na obtekajúci vzduch. Avšak kvôli technickým obmedzeniam nie je vždy možné simulovať podrobne spracovaný model, preto sa neustále musia robiť kompromisy v tom, čo je do modelu ešte potreba znázorniť a na druhej strane ktoré detaily už budú mať zanedbateľný vplyv. [3]

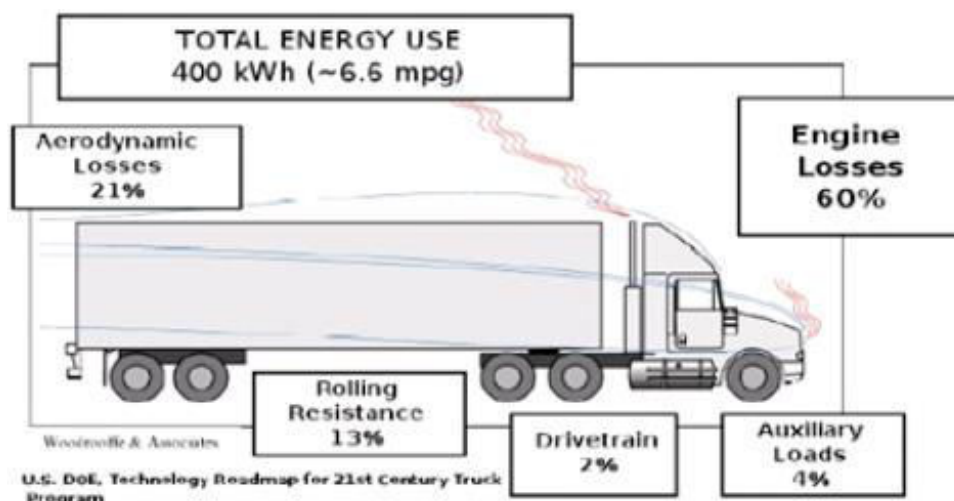


Obr. 3 Testovanie aerodynamiky vozidla pomocou počítačovej simulácie [10]

1.3 PRIORITNÉ ÚLOHY AERODYNAMIKY PRE NÁKLADNÉ SÚPRAVY

Konkrétne ciele aerodynamiky sa odlišujú pre prípad osobných automobilov, kde je pomimo komfortu, bezpečnosti tiež snaha o dosiahnutie čo najlepších jazdných vlastností ako je napr. maximálna rýchlosť a zrýchlenie. Na spotrebu paliva sa väčšinou nekladie tak výrazný dôraz. Naopak pre komerčné vozidlá a v našom prípade nákladné súpravy je kľúčové dosiahnuť okrem iného čo najnižšiu spotrebu paliva, čo v dôsledku zníži prevádzkové náklady na palivo. Taktiež dôležitý je aj komfort pre cestujúcich, ktorý je podmienený prúdením vzduchu vnútri kabíny a aerodynamickým hlukom. Zrýchlenie a maximálna rýchlosť nehrajú pri navrhovaní nákladného vozidla tak veľkú rolu.

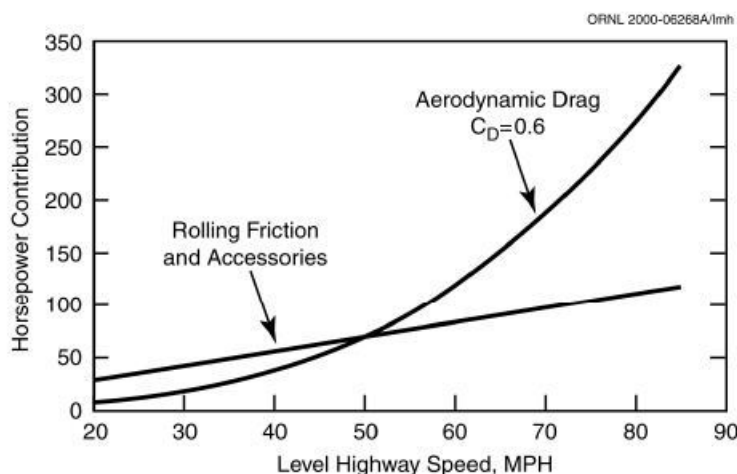
Pri diaľničnej jazde sa najviac energetických strát eviduje v motore, kde straty majú väčší podiel na celkovej použitej energii ako všetky ostatné dokopy. Aerodynamické straty majú pri rýchlosti 65 míľ za hodinu (približne 105 km/h) asi päťtinový podiel na celkovej spotrebe energie a z hľadiska použiteľnej energie z motora je aerodynamika zodpovedná dokonca za väčšinu strát, preto ich v žiadnom prípade nie je možné zanedbať.



Obr. 4 Približné percentuálne vyjadrenie vplyvu jednotlivých faktorov na celkovú energetickú spotrebu súpravy pri rýchlosti 65 míľ za hodinu (105 km/h).

Celková spotreba energie 400 kWh: Straty v motore 60%, Aerodynamické straty 21%, Valivý odpor 13%, Hnacie ústrojenstvo 2%, Ďalšie zaťaženia 4% [17]

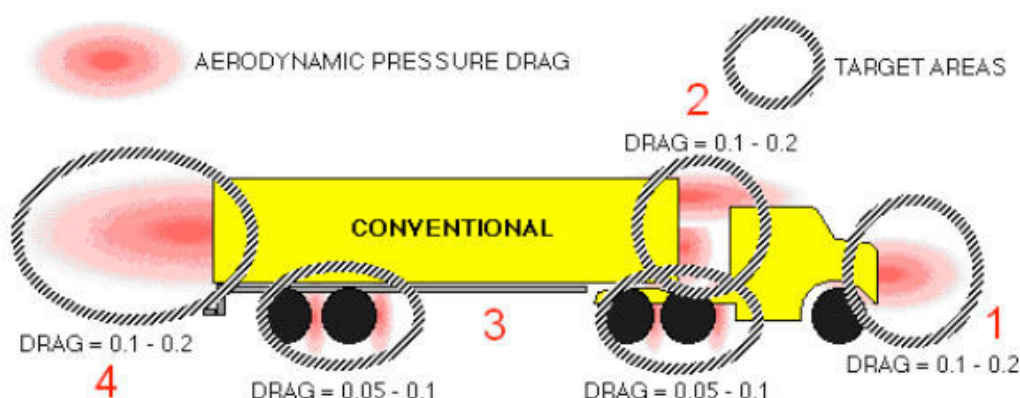
Vzhľadom k tomu, že valivý odpor rastie s rastúcou rýchlosťou lineárne a aerodynamický odpor kvadraticky, existuje rýchlosť, po prekročení ktorej má aerodynamický odpor väčší vplyv na potrebný výkon ako odpor valivý. Táto rýchlosť sa pohybuje približne na úrovni 50 míľ za hodinu (80 km/h). Preto sú aerodynamické vylepšenia najúčinnnejšie práve pri diaľničných rýchlostiach a na opačnej strane pri prevažujúcej mestskej jazde sa tieto zariadenia neoplatí inštalovať.



Obr. 5 Porovnanie závislosti potrebného výkonu (v koňoch) na prekonanie aerodynamického (pri $C_D = 0,6$) a valivého odporu na rýchlosti na rovnej diaľnici (v míľach za hodinu) [21]

2 AERODYNAMICKÉ VYLEPŠENIA

Z aerodynamického hľadiska je možné pomyselne rozdeliť nákladnú súpravu na konkrétne problematické kľúčové oblasti, ktoré majú najväčší dopad na celkový odpor vzduchu, ktorý musí vozidlo prekonávať.



Obr. 6 Konkrétne problematické oblasti konvenčnej súpravy (zakrúžkované) [17]

Vzhľadom k tomu, že na jeden ťahač pripadá zväčša viac návesov (podobná situácia je aj pri súpravách s vlekom), je z ekonomického hľadiska výhodnejšie investovať do aerodynamických prvkov na ťahači. Moderné ťahače a nákladné automobily majú mnoho prvkov už od výroby integrovaných, ale aj na staršie modely, ktorým chýbajú, je možné niektoré doplnky bez problémov aplikovať.

V nasledujúcom texte sú pre lepšiu predstavu miestami uvádzané percentuálne úspory na palive. Predpoklady pri odhade zníženia spotreby paliva boli nasledovné:

1. Hmotnosť súpravy: 40 ton (pre návesovú súpravu aj súpravu s vlekom)
2. Zloženie cesty: 40% pri stálej rýchlosti 90 km/h, 20% rýchlostná cesta so zákrutami, 20% typická prímestská cesta, 5% kopcovitá, 15% mestská.
3. Súprava je bez akýchkoľvek vylepšení. [23]

2.1 PREDNÁ ČASŤ ŤAHAČA

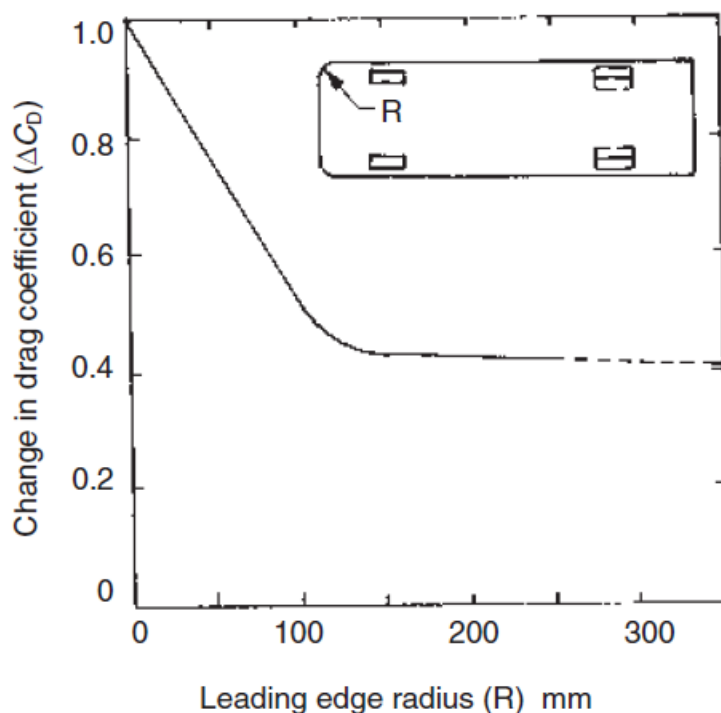
Je to miesto vysokého tlaku a kľúčová oblasť pretože ako prvá interaguje s okolitým vzduchom a rozdeľuje prúd vzduchu. Prúdenie pod ťahač sa snažíme v čo najväčšej miere obmedzovať pretože nezakrytá spodná časť ťahača je zväčša veľmi členitá, čo spôsobuje turbulentné prúdenie a v konečnom dôsledku nepriaznivo vplýva na aerodynamiku vozidla, preto je prúd vzduchu usmerňovaný cez boky a ponad ťahač, kde je možnosť vyššej kontroly obtekajúceho vzduchu.

2.1.1 ZAOBLENIE HRÁN

Je celkom zrejmé, že ostré predné hrany nemajú na aerodynamiku nákladného vozidla väčšinou dobrý vplyv (existuje však prípad, kedy sa oplatí nechať hornú hranu ostrú, viď nižšie). Čo však možno nie je natoľko intuitívne je skutočnosť, že existuje akési pomyselné krajné zaoblenie, kedy väčšie zaoblenie už stráca zmysel, pretože už prakticky neprináša žiadne ďalšie výhody. Toto hraničné zaoblenie závisí od rýchlosti vozidla, pri 80 km/h je to 75 mm a polomer 150 mm pokryje celú škálu rýchlostí. Priebeh c_D v závislosti na polomere zaoblenia bočnej hrany R je na Obr. 7. Pre približnú orientáciu je možné uviesť, že na samotnom ťahači sa môže koeficient odporu zmenšiť z vyše 1,15 v prípade ostrých hrán na 0,6 po zaoblení. [23]

Zatiaľ čo bočné hrany sa oplatí zaobľovať vo všetkých prípadoch, rovnaké neplatí úplne vždy pre hranu hornú. Pri splnení nasledujúcich 3 podmienok je výhodnejšie ju ponechať ostrú:

1. Na vozidle nie je nainštalovaný deflektor alebo jemu podobné zariadenie.
2. K ťahaču je väčšinu času pripojená nákladná časť.
3. Náves je aspoň o 20% vyšší ako ťahač. [23]



Obr. 7 Vplyv polomeru zaoblenia bočnej hrany R na zmenu c_D [2]

2.1.2 USMERŇOVAČE VZDUCHU

Vyčnievajúce usmerňovače vzduchu, zvyčajne umiestnené na predných bočných hranách ťahača pod čelným sklom primárne napomáhajú k zníženiu zanášania dverí a bočných okien nečistotami (prúd vzduchu, ktorý z nich vychádza tvorí akúsi záclonu medzi kolesom a kľučkou dverí / oknom). V dôsledku toho sa môže zlepšiť bezpečnosť jazdy pretože má vodič neustále dobrý výhľad a rovnako má pozitívny vplyv na vzhľad vozidla, v dôsledku čoho znamená menej časté umývanie, čo svojim spôsobom taktiež napomáha znížiť náklady na prevádzku. Takisto môžu znížiť odpor vzduchu v prípade, že hrany boli pôvodne príliš ostré. [23] Môžeme sa už



stretnúť aj s modernejším dizajnom, kde je usmerňovač zapustený a natoľko nepresahuje, vid' Obr. 8 b).

Spotreba: -0,3% návesové súpravy
 -0,3% súpravy s vlekom [23]



Obr. 8 Usmerňovače vzduchu
a) konvenčný dizajn [8] b) jedno z modernejších prevedení [19]

2.1.3 SPOJLER

Spojler je prídavná časť upevnená o nárazník zospodu a jeho hlavnou úlohou je odkláňať vzduch smerom k viac aerodynamickým bočným a horným plochám a obmedzovať tak v maximálnej miere prúdenie popod ťahač. Väčšina moderných ťahačov sú už od výroby opatrené týmto prvkom. Najväčšiu efektivitu vykazujú v prípade čelného vetra a súprav s vlekom, na druhej strane v prípade návesových súprav môžu za určitých podmienok dokonca zvýšiť odpor. Taktiež platí, že s rastúcou dĺžkou nákladného auta klesá účinnosť tohto prvku.

Pre odklonenie čo najväčšieho množstva obtekajúceho vzduchu je pochopiteľne najvýhodnejšie, aby spodná hrana spojlera bola čo najnižšie, ale je potreba brať do úvahy aj kvalitu ciest a dávať pozor, aby sa v žiadnom prípade neodieral o zem. [23]

Spotreba: -0,3% návesové súpravy
 -0,3% súpravy s vlekom [23]



Obr. 9 Prídavný spojler na ťahač[9]

2.1.4 AERODYNAMICKÉ SPÄTNÉ ZRKADLÁ

Spätné zrkadlá na nákladných vozidlách svojou prítomnosťou nepriaznivo vplývajú na celkové aerodynamické vlastnosti, ale pozmenením tvaru na viac aerodynamický je možné dosiahnuť určitých zlepšení. [23]

Ďalším alternatívnym riešením danej problematiky je použitie kamier, čo nielenže pochopiteľne zníži odpor vzduchu, ale rovnako môže napomôcť vodičovi k lepšej orientácii pri riadení vozidla.

Spotreba: -0,1% návesové súpravy
 -0,1% súpravy s vlekcom [23]



Obr. 10 Aerodynamické spätné zrkadlá[24]



2.1.5 SLNEČNÁ CLONA

Ako je už z názvu patrné, hlavnou funkciou slnečnej clony je redukovať oslnenie vodiča vplyvom svietiaceho slnka, avšak má rovnako aj dopad na aerodynamiku nákladného vozidla. Poznáme základné 2 konštrukčné prevedenia, jedným je jednoduchý horizontálny výčnelok z hornej časti kabíny. Toto riešenie však zvýši aerodynamický odpor takmer vo všetkých prípadoch. Druhým riešením je zvislý kus plastu, ktorý mierne prečnieva do priestoru čelného skla, čo je výhodnejším dizajnom z hľadiska aerodynamiky nakoľko napomáha v prípade, že je horná strana príliš ostrá a na druhej strane u nákladných vozidiel so zaoblenou hranou nepridáva toľko na odpore oproti prvému riešeniu. Dobre spolupracuje s deflektormi a strešnými spojlermi. [23]

Spotreba: -1,6% návesové súpravy
 -1,9% súpravy s vlekom [23]

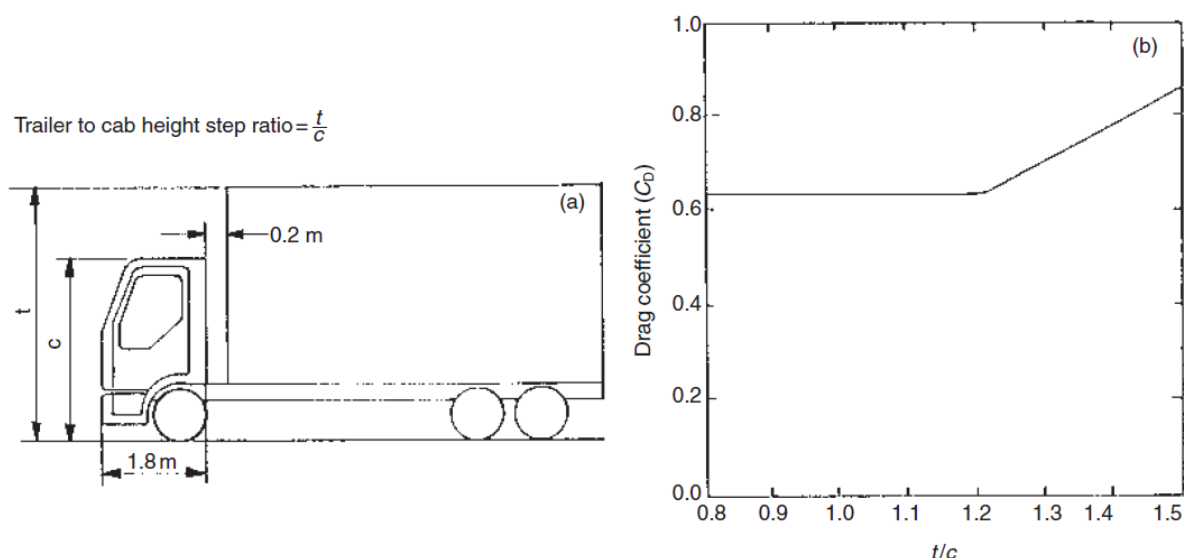


Obr. 11 Najpoužívanéjšie prevedenie slnečnej clony [4]

2.2 PRECHOD MEDZI KABÍNOU A NÁVESOM

Rovnako problematickým miestom je nespojitý úsek medzi kabínou a návesom. Výška kabíny musí byť správne prispôsobená výške návesu. V prípade nesprávneho nastavenia ide o jeden z najvplyvnejších faktorov na konečný aerodynamický odpor, preto je veľmi vhodné klásť prednostne dôraz práve na túto časť súpravy. Výskumy vo veterných tuneloch ukazujú závislosť hodnoty aerodynamického odporu na pomere výšky návesu k výške kabíny (viď *Obr. 12*). Pre danú konfiguráciu nákladného vozidla bolo zistené, že až do pomeru výšok 1,2 nebol zaznamenaný žiadny výrazný nárast c_D , zatiaľ čo pri vyšších hodnotách pomeru začal koeficient odporu rásť úmerne s t/c . Pri pomere 1,5 bol zaznamenaná hodnota c_D 0,86, zatiaľ čo pri 1,2 to bolo iba 0,63, čo zodpovedá výraznému nárastu o 0,23. [2]

Pre návesové súpravy s zaoblenou prednou hranou na streche ťahača je najmenší odpor vzduchu dosiahnutý ak výška ťahača ľahko prevyšuje výšku návesu (optimálne približne o 0,1 m). [23]



Obr. 12 Vplyv pomeru výšky návesu a výšky kabíny na súčiniteľ odporu. a) konfigurácia (t - výška nákladného priestoru, c - výška kabíny), b) závislosť. [2]

Veľká medzera medzi ťahačom a návesom / nákladným autom a prívesom tiež veľmi nepriaznivo vplyva na aerodynamiku vozidla pretože v tejto oblasti dochádza k neusporiadanému turbulentnému prúdeniu. V prípade nákladných vozidiel s prívesmi je možné správnou optimalizáciou dosiahnuť zníženie odporovej sily až o tretinu v prípade čelného vetra a ešte viac v prípade bočného. Dvoma limitujúcimi faktormi pri minimalizovaní medzery je potreba zachovania manévrovateľnosti súpravy a zachovanie prístupnosti priestoru pre jednoduché pripojenie návesu, resp. prívesu. Taktiež v prípade návesovej súpravy je dobré pamätať, že pri zmenšení medzery sa môže zmeniť zaťaženie zadnej nápravy, čo môže mať za následok nepriaznivý vplyv na riadenie. [23]

2.2.1 STREŠNÝ DEFLEKTOR

Deflektor môže mať rôzne tvary a veľkosti, ale väčšinou ide o jednoduchú plochú prípadne zakrivenú plastovú dosku pripevnenú na strechu kabíny, ktorá má za úlohu kompenzovať výškový rozdiel kabíny a návesu usmerňovaním prúdu vzduchu jemne ponad úroveň hornej strany návesu. Výhodou strešných deflektorov je možnosť ich uhlovej regulácie, ktorá umožňuje nastaviť vyhovujúci sklon pre danú výšku návesu, pričom súpravy s väčšou medzerou medzi kabínou a návesom sú omnoho citlivejšie na nastavenie uhlu ako nákladné vozidlá s malou medzerou (pevné). [2]

Je rovnako dôležité si u návesových súprav pamätať, že deflektor v odklopenej polohe zlepšuje aerodynamické vlastnosti iba v prípade, že k ťahaču je pripojený náves. V opačnom prípade má negatívny efekt a je vhodné ho sklopiť pre zníženie odporu. [16] Nakoľko ide väčšinou o plochú platňu, najlepšiu funkčnosť vykazujú pri čelnom vetre. Pre mierne zlepšenie je vhodné zakryť boky a spodok deflektoru pre zabránenie prúdenia vzduchu cez a pod deflektor, tieto problémy rieši použitie lisovaného strešného spojleru. [2]

Spotreba: -2,4% návesové súpravy
-1,2% súpravy s vlekom [23]



Obr. 13 Strešný deflektor s nastaviteľným sklonom a zakrytými bokmi [13]

2.2.2 STREŠNÝ SPOJLER

Ide o jeden z najlepších aerodynamických prvkov v prípade, že je adekvátne rozmerovo vyhovujúci. Jedná sa o trojrozmerný výlisok, ktorý sa pripieňuje na strechu kabíny a môže ale nemusí mať nastaviteľný sklon. Rovnako ako deflektory zabezpečuje plynulý prechod medzi kabínou a návesom a tak zlepšuje aerodynamické vlastnosti, avšak v lepšej miere ako deflektory. [16]

Najlepšie priemerné výsledky vo všetkých veterných podmienkach vykazujú spojler, ktoré sú v tvare písmena "U" pri pohľade zhora. Ideálnych výsledkov sa dosiahne pri spoločnom použití s bočnými deflektormi. Pri nastaviteľných spojleroch platia rovnaké zásady ako pri použití deflektoru. [23]

Spotreba: -3,7% návesové súpravy
 -2,3% súpravy s vlekcom [23]



Obr. 14 Strešný spojler spolu s bočnými deflektormi [15]



2.2.3 BOČNÉ DEFLEKTORY

Bočné deflektory majú za úlohu premostiť medzeru medzi ťahačom a návesom pozdĺž bočných hrán. Je najvhodnejšie ich použiť v spojení so strešným deflektorom, prípadne spojlerom pre najomptimálnejší prechod medzi kabínou a návesom [16]

Ponúkajú rovnako prídavnú stabilitu v prípade bočného vetra a pri pohľade spredu by nemali presahovať šírku návesu, inak hrozí zvýšenie aerodynamického odporu. [23]

Spotreba: -0,6% návesové súpravy [23]

2.3 KOLESÁ A PODVOZOK

Oblasť pod súpravou je výrazne členitá a preto sa snažíme zabráňovať vzduchu dostať sa do týchto miest rôznymi krytmi.

Ďalším potenciálnym problémom u neokrytovaných súprav je prskanie vodou a blatom, ktoré môže na krátku chvíľu výrazne obmedziť až úplne znemožniť viditeľnosť okoloidúcim vozidlám. To môže byť nebezpečné najmä pre predbiehajúce autá.

2.3.1 BOČNÉ PANELY

Zakrývajú spodnú časť prívesu, prípadne návesu u návesových súprav a premostujú medzeru medzi prednou a zadnou nápravou u nákladných automobilov. Svoju užitočnosť predstavujú v podmienkach bočného vetra v tvare zvýšenej stability a väčšinou nepotrebujú žiadnu reguláciu. Avšak majú aj dôležitú sekundárnu funkciu, ktorou je zníženie miery rozprašovania vody a nečistôt čo sa prejaví zvýšenou bezpečnosťou okoloidúcich vozidiel, cyklistov a chodcov a potenciálne aj pre samotného vodiča nákladného vozidla. [23]

Spotreba: -0,4% návesové súpravy
-0,7% súpravy s vlekcom [23]



Obr. 15 Bočné panely použité na návese [12]



2.3.2 KRYTY PALIVOVEJ NÁDRŽE

Majú za úlohu premostiť medzeru medzi prednými a zadnými kolesami ťahača a tak zabrániť vzduchu prenikať do týchto oblastí. Ďalšou výhodou je, podobne ako u bočných panelov návesu, značné obmedzenie rozprašovania. Taktiež zlepšujú vlastnosti v podmienkach bočného vetra.

Spotreba: -0,6% návesové súpravy [23]



Obr. 16 Bočný panel na ťahači [14]

2.3.3 KRYTY KOLIES

Prúdiaci vzduch vchádzajúci do priestoru vnútra disku otáčajúceho sa kolesa má rovnako nezanedbateľný vplyv na celkový odpor vzduchu. Preto je snaha zabrániť vstupu vzduchu rôznymi krytmi kolies. Z praktického hľadiska môže byť potenciálne pod otázkou chladenie a možnosť vizuálnej a tlakovej kontroly kolesa, avšak mnohí výrobcovia majú tieto faktory na pamäti a navrhujú kryty s rôznymi priehľadnými okienkami prípadne otvormi.



Obr. 17 Kryty kolies s otvormi [1]



2.4 ZADNÁ STRANA NÁVESU

Zadná strana predstavuje rovnako značne problematický úsek z hľadiska aerodynamiky z dôvodu vzniku výraznej podtlakovej zóny za návesom (resp. prívesom). Avšak práve zadnú stranu je pomerne zložitú aerodynamicky optimalizovať z viacerých závažných dôvodov.

Prvým je objem nákladného priestoru, ktorý musí byť čo najrozmernejší pre prevoz najväčšieho množstva tovaru. To vysvetľuje aerodynamicky nie veľmi priaznivý krabicový tvar úložného priestoru.

Ďalším problémom je maximálna dĺžka a výška návesu, ktorá je stanovená miestnymi nariadeniami a nesmie byť presiahnutá. Práve toto predstavuje pravdepodobne najväčší problém pri navrhovaní aerodynamických vylepšení.

Z praktického hľadiska môže nastať problém pri nakladaní a vykladaní tovaru keďže väčšinou sa toto uskutočňuje práve cez zadnú stranu. Preto akékoľvek vylepšenia by mali byť navrhnuté pre zachovanie jednoduchého prístupu.

Ako aj v prípade ostatných vylepšení je kľúčové nájsť vhodný kompromis medzi funkčnosťou daného vylepšenia a jeho praktickým prevedením. Toto sa snažia dosiahnuť nasledujúce zariadenia, ktorých hlavným cieľom je väčšinou redukovať veľkosť tejto podtlakovej oblasti a tak znížiť aerodynamický odpor.

2.4.1 KONIEC NÁVESU

Na trhu existuje množstvo rôznych prevedení konca návesu, ktoré ale majú všetky rovnakú úlohu, odlišujú sa iba v konštrukčnom riešení. Jedným z riešení danej problematiky sú skladacie konce návesu, jedným z najznámejších je TrailerTail® od spoločnosti STEMCO. Ide o jednoduchú nadstavbu na zadnú stranu návesu, ktorá bola vyvinutá pre čo najpraktickejšie využitie. Skladá sa z plochých panelov ktoré predlžujú zadnú stranu návesu a zároveň sú vzhľadom k jednotlivým plochám návesu o určitý uhol naklopené, čím sa vytvorí na konci mierne zúženie. Dosiahne sa tak omnoho lepšej kontroly nad obtekajúcim vzduchom, zmenší sa odpor vzduchu a tým aj spotreba a zlepší sa stabilita. Rovnako má pozitívny vplyv na bezpečnosť účastníkov cestnej premávky nakoľko redukciou turbulentnej oblasti za návesom sa zníži rozprašovanie vody a nečistôt a tak zlepšuje viditeľnosť.

Skladací dizajn je postavený na princípe súčasného sklápania / rozklápania konca a otvárania / zatvárania nakladacieho priestoru. Vďaka skladaciemu dizajnu sa s otváraním zadných dvierok na návese koniec zároveň skladá a so zatváraním sa rozkladá. Alternatívnym dizajnom je automatický samootvárač, ktorý odklopí koniec ak vozidlo prekročí rýchlosť 35 míľ za hodinu (približne 56 km/h). [22]

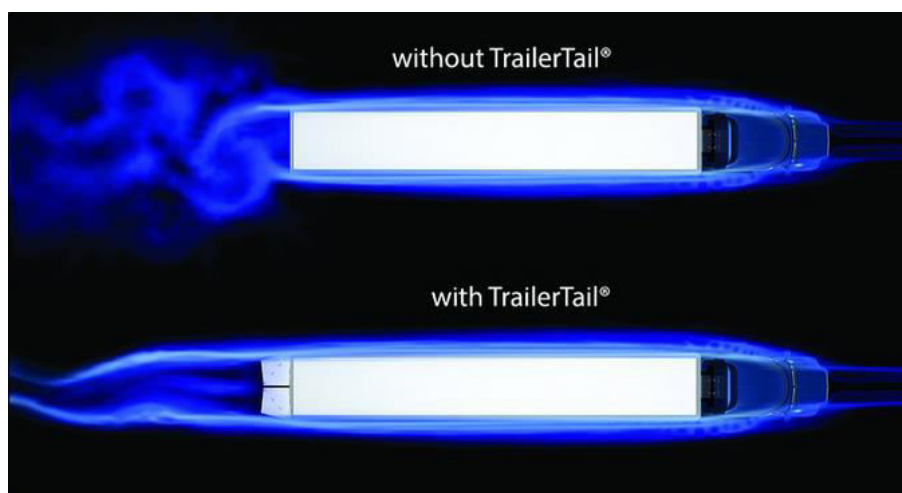
Spotreba: -5,5% pre všetky súpravy [22]



Obr. 18 Skladací koniec návesu [22]



Obr. 19 Ukážka princípu skladacieho systému [22]

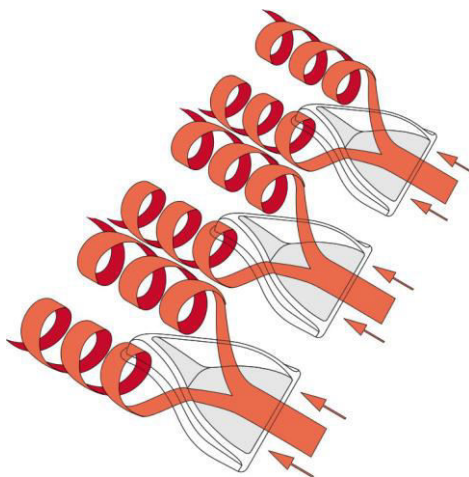


Obr. 20 Porovnanie prúdenia vzduchu bez (hore) a s (dole) nainštalovaným koncom [22]

2.4.2 GENERÁTORY VÍRENIA

Ďalším pozoruhodným riešením sú generátory vírenia, ide o malé špeciálne tvarované prvky, ktoré interagujú s prechádzajúcim vzduchom tak, že z jedného zväzku vzduchu tvoria dva vzájomne opačne rotujúce víry. Napomáhajú jednak k zvýšeniu stability a k zlepšeniu viditeľnosti v podmienkach dažďa alebo snehu ale najmä k zníženiu turbulencie (a tak aj k zníženiu odporu vzduchu) v hlavných oblastiach výskytu týchto neusporiadaných prúdení: zadná strana nákladnej súpravy a prechod medzi kabínou a návesom. Ich prednosťami sú nízka cena, jednoduché a rýchle osadenie. Navyše vďaka svojej malej veľkosti nemenia vzhľad ani rozmery nákladnej súpravy. [6]

Spotreba: -2 až 5% podľa konfigurácie [6]



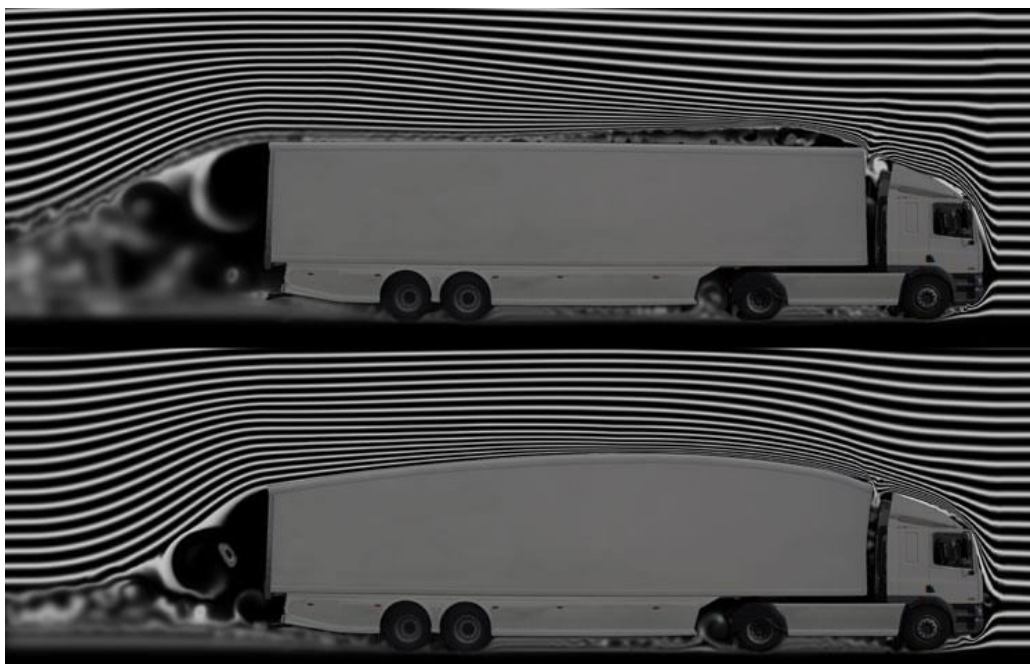
Obr. 21 Znáznornenie funkcie generátorov vírenia [25]

2.4.3 KVAPKOVITÝ NÁVES

Najúčinnejším riešením danej problematiky sa javí byť použitie špeciálneho návesu v tvare kvapky slzy, ktorý zaistí, že vzduch hladko obteká náves a prúdnice sa pozdĺž hornej strany tak výrazne neodtrhávajú od povrchu, čo znamená zmenšenie veľkosti turbulentných oblastí za návesom až ich úplné potlačenie v oblasti prechodu ťahača a návesu.

Takýto dizajn sa snaží presadiť spoločnosť Don-Bur, ktorí uvádzajú, že ich riešenie má jednak okrem výrazného zlepšenia aerodynamickej efektivity a teda v dôsledku aj spotreby paliva radu iných výhod, medzi ktoré patrí napríklad zvýšená kapacita nákladného priestoru, dobrá kompatibilita a zlepšený estetický vzhľad súpravy. Náves vyvíjajú v širokej rade konfigurácií, napríklad pre bočné a zadné nakladanie tovaru, pričom spĺňajú maximálne povolené rozmery súpravy.

Spotreba: -11,3% [20]



Obr. 22 Porovnanie klasického (hore) a kvapkovitého (dole) návesu vo veternom tuneli[20]



ZÁVER

V práci boli predstavené základné druhy aerodynamických prvkov pre nákladné súpravy, ich výhody a podstata ich funkcie. Každá zo štyroch uvedených problematických oblastí má pritom približne podobný podiel na celkovom aerodynamickom odpore súpravy.

Avšak je možné sa na to pozerat' aj z inej strany. Ak by sme všetky rozdelili prvky na prvky určené pre ťahač (resp. nákladné auto) a prvky pre náves (resp. príves), zistíme, že sa celkovo teoreticky viac oplatí investovať do návesu, ale zase na druhej strane pripadá väčšinou na jeden ťahač viac návesov, čo by zase znamenalo, že by bolo ekonomicky výhodnejšie investovať iba do ťahača. Preto je pravdivosť jedného alebo druhého tvrdenia niekedy otázna a mnoho záleží na konkrétnej situácii. V konečnom dôsledku je už len na zvážení majiteľa súpravy, ktoré z vylepšení sa rozhodne aplikovať.

Niektoré z prvkov, najmä na ťahači a nákladnom aute sú už predinštalované od výroby, ale aj napriek tomu neprestajne existuje relatívne značný potenciál zníženia spotreby paliva, čo aj je jednou z kľúčových úloh vývoja aerodynamických vylepšení, niektoré prvky už možno s aktuálnym dizajnom nemôžu priniesť viac výhod, ale o to výnimočnejšie bude sledovať nové nápady konštrukčných prevedení. Preto je v budúcnosti tohto odvetvia možné očakávať okrem ďalšieho zlepšovania aktuálnych prvkov aj rôzne odvážne dizajnové riešenia, ktoré ale vždy sprevádzali vývoj zariadení vo všetkých odvetviach strojárskoho priemyslu.



POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] *121 Ways to Save Fuel: Equipment* [online]. TruckingInfo.com, 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.truckinginfo.com/article/print/story/2014/06/121-ways-to-save-fuel-equipment.aspx>
- [2] HEISLER, Heinz. *Advanced Vehicle Technology*. 2. Elsevier Science, 2002. ISBN 0750651318.
- [3] *Aerodynamic Wind Tunnel Testing for SmartWay Verification* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/smartway/forpartners/documents/aerodynamic/420f15012.pdf>
- [4] *Aerodynamics* [online]. Scania [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www.scania.com/global/trucks/main-components/cabs/exterior/aerodynamics/>
- [5] HUCHO, W. H. *Aerodynamics of road Vehicles*. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 07-680-0029-7.
- [6] *Airtabs™* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.airtab.com/index.htm>
- [7] *Analýza niektorých okrajových podmienok vplyvujúcich na voľbu svetlosti vodovodného potrubia v bytovom dome* [online]. tzbportal.sk, 2013 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.tzbportal.sk/kurenje-voda-plyn/analiza-niektorych-okrajovych-podmienok-vplyvujucich-na-volbu-svetlosti>
- [8] *Cargo truck* [online]. HYUNDAI MOTOR COMPANY [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://www.hyundai.sa/cargo_truck/
- [9] *DAF XF 106 Spoiler for under the bumper* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.truck-accessoires.nl/en/daf-xf-106-spoiler-for-under-the-bumper.html>
- [10] *Challenging Orthodox Truck Design* [online]. Symscape, 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.symscape.com/blog/challenging-orthodox-truck-design>
- [11] *Laminárne a Turbulentné prúdenie* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://physedu.science.upjs.sk/kvapaliny/lamturprud.htm>
- [12] *Laydon Composites' New TrailerSkirts Are CARB-Certified* [online]. Trucking Info, 2010 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.truckinginfo.com/article/story/2010/02/laydon-composites-new-trailerskirts-are-carb-certified.aspx>
- [13] *MAN TGA/TGS L Cab High Volume Air Management Kit* [online]. Kuda UK LTD [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.kudauk.ltd.uk/product/man-tgatgs-l-cab-high-volume-air-management-kit>
- [14] *Mercedes Actros 4 (2012 On.) Stream/Bigspace. 6x2 Sideskirts* [online]. Kuda UK LTD [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.kudauk.ltd.uk/product/mercedes-actros-4-2012-0n-streambigspace-6x2-sideskirts>



- [15] *Mercedes Axor Day Cab Spoiler & Collar Kit* [online]. Kuda UK LTD [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.kudauk.ltd.uk/product/mercedes-axor-day-cab-spoiler--collar-kit>
- [16] *Quick Guide to Truck Aerodynamics* [online]. 2009 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.somax-driver-training.com/sites/default/files/attachments/Somax%20-%20FBP%20-%20Quick%20Guide%20to%20Truck%20Aerodynamics.pdf>
- [17] M.J. Bradley & Associates LLC. *Reducing Aerodynamic Drag & Rolling Resistance from Heavy-Duty Trucks* [online]. 2012 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/AERO_RR_Technologies_Whitepaper_FINAL_Oct2012.pdf
- [18] *Reynolds number* [online]. The Worlds of David Darling [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/Reynolds_number.html
- [19] *Scania Streamline – smoothing the shape to cut drag and boost earnings* [online]. Scania, 2013 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.scania.com/group/en/scania-streamline-smoothing-the-shape-to-cut-drag-and-boost-earnings/>
- [20] *Teardrop™* [online]. Don-Bur (Bodies & Trailers) Ltd, 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.donbur.co.uk/gb-en/docs/150320-Don-Bur-Teardrop-Brochure.pdf>
- [21] *Technology Roadmap for the 21st Century Truck Program* [online]. 2000 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://infohouse.p2ric.org/ref/46/45735.pdf>
- [22] *TrailerTail® Fuel Savings Technology* [online]. STEMCO lp [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.stemco.com/product/trailertail/>
- [23] ETSU, MIRA. *Truck aerodynamic styling* [online]. Crown copyright, 2001 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20060210_121817_04842_GPG308.pdf
- [24] *Visibility* [online]. Scania [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.scania.com.au/trucks/main-components/cabs/interior/visibility/>
- [25] *What are Airtabs?* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.airtab-uk.com/AirtabInformation/WhatareAirtabs.aspx>
- [26] *Základní pojmy dynamiky tekutin* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/123-zakladni-pojmy-dynamiky-tekutin>



ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

c	[m]	výška kabíny
c_D	[-]	súčiniteľ aerodynamického odporu
D	[m]	charakteristický rozmer telesa
F_o	[N]	odporová sila vzduchu
R	[mm]	polomer zaoblenia bočnej hrany
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	čelná plocha vozidla
t	[m]	výška nákladného priestoru
v	[m/s]	rýchlosť vozidla
μ	[Pa.s]	dynamická viskozita
ρ	[kg/m ³]	hustota okolitého prostredia